

一种基于不变量结构分解的工作流性能分析方法

庞善臣^{1,2)} 蒋昌俊³⁾

¹⁾(山东科技大学信息科学与工程学院 青岛 山东 266510)

²⁾(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

³⁾(同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室 上海 201804)

摘 要 基于工作流的 Petri 网结构化建模方法,证明了 workflow 网的 P -不变量存在性、可覆盖性,给出了一个 workflow 模型可靠性(soundness)的充要条件,得到了基于 P -不变量的多项式分解算法,克服了非多项式算法遍历的不足,降低了时间和空间复杂度,基于 workflow 网的定义,给出了包含时间等信息的广义 workflow 网的概念,在结构分解的基础上,利用矩姆函数,建立了 workflow 的时间性能分析方法,所得结果为 workflow 模型分析和验证提供了理论基础和依据,并可有效降低 workflow 系统的分析复杂度,对于分析 workflow 系统处理业务实例的能力,提高业务处理效率有重要意义,给出的实例验证了算法的有效性。

关键词 广义 workflow 网;不变量;矩姆函数;多项式算法;性能分析

中图法分类号 TP311 **DOI 号**: 10.3724/SP.J.1016.2010.00908

Workflow Performance Analysis Based on Invariant Decomposition Algorithm

PANG Shan-Chen^{1,2)} JIANG Chang-Jun³⁾

¹⁾(College of Information Science & Engineering, Shandong University of Science & Technology, Qingdao, Shandong 266510)

²⁾(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

³⁾(Key Laboratory of Embedded System and Service Computing, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract A new necessary and sufficient condition for the soundness of workflow model is presented based on the Petri Nets modeling techniques in this paper. Some properties, such as the existence of P -invariant and the cover sets of the WF-net places are analyzed and verified. A polynomial algorithm of workflow model decomposition based on P -invariant is presented, and then the Generalized WF-net(GWF-net) is defined. A new time performance analysis method to GWF-net is set up that the decomposition algorithm and moment generation function unite. Compared with other exponential algorithms, the method can get over the shortage of the search method and reduce consumedly decomposition complexity of the workflow net, and the algorithms has the advantage that its form is simple, understandable easily and the operation is easy very much. The results provide a new method for workflow system analysis and verification, and can also effectively reduce the analyzing complexity of the workflow systems, and it is important to analyze the ability to deal with the business process of workflow system, and improve the efficiency for workflow system to deal with the business process. The usability of the research results in this paper is illustrated by an example.

Keywords generalized WF-net; invariant; moment generation function; polynomial algorithm; performance analysis

1 引言

工作流是一类可完全或部分自动完成的业务过程,依据一系列过程规则,文档、信息或任务在不同的参与者之间传递^[1],作为成功实施工作流管理的关键,其建模、分析和优化方法成为工作流技术的一个研究重点^[2].由于 Petri 网具有图形化表达的形式语义、基于状态的流程描述方式及丰富的模型分析方法,又具有严格的数学基础,能自然地描述并发、同步、资源冲突等系统特性,自含执行控制,是目前工作流建模的主要方法之一^[3],主要有时间 Petri 网(Timed Petri Net, TPN)^[4-6]、有色 Petri 网(Colored Petri Net, CPN)^[7-8]、随机 Petri 网(Stochastic Petri Net, SPN)^[9]和逻辑 Petri 网(Logical Petri Net, LPN)^[10-11]等模型,其研究主要集中在工作流过程逻辑的可靠性(Soundness)以及工作流的性能分析等方面.

工作流网成功地实现了工作流系统的过程逻辑层次的描述,而要进一步分析工作流系统的性能,需要将资源和时间信息元素引入到工作流模型中.

工作流的性能分析主要包括以下几个内容:工作流中的资源利用率(或负载率)、工作流系统的吞吐率、工作流系统的稳定性、业务实例在工作流系统中的滞留时间、工作流的关键路径及最短路径等,分析方法主要有基于 Petri 网的化简策略、基于 Markov 链的分析方法、基于矩姆函数方法、基于排队论分析方法、基于行为表达式分析方法等.其中化简策略主要利用功能和行为等效机制,将复杂结构简化为一个简单结构,来分析工作流的性能,这种方法对分析工作流的时间性能具有较好效果,但在分析工作流的资源性能时却无能为力,因为在结构化简过程中,因化简带来的黑盒现象,工作流的资源信息将会丢失;基于 Markov 链的分析方法和基于矩姆函数方法虽然可以分析系统的资源和时间特性及系统稳定性,但需要得到模型的每一个状态分布情况,随着规模的扩大,其分析的时间复杂性和空间复杂性均呈指数增长;基于排队论分析方法是工作流模型中的每一个变迁看成一个服务系统,可以较好地分析工作流系统的时间、资源及稳定性;基于行为表达式的分析方法为工作流系统性能分析提供了一种新方法,其最大特点是避免了求解系统模型的各种状态,但求解行为表达式也是系统深度遍历的过程,仍然具有较高的时间复杂性.

Petri 网的化简技术作为系统性质分析的一种有效手段,被成功应用于柔性制造系统(Flexible Manufacturing Systems, FMS)、协议分析(Protocol Analysis)、嵌入式系统(Embedded System)、企业经营过程(Business Process Reengineering, BPR)等领域,却不可避免因结构变化造成黑盒现象而带来的大量信息丢失.针对分布异构环境中长期运行、开销较大的复杂工作流,在分析过程中既能有效避免状态爆炸问题,又能保证多项式的时间分析复杂度的算法尚不多见.

针对上述问题,基于工作流的 Petri 网结构化建模方法,本文提出了一种基于 P -不变量的多项式分解算法,将一个复杂的、可靠的工作流网分解成一组简单的能够描述业务实例处理过程的子网类,通过分解,既能够有效避免状态爆炸问题,降低空间复杂度,又能够降低工作流系统分析的时间复杂性,提高分析效率.

本文提出了广义工作流网的概念,证明了工作流网的 T -不变量和 P -不变量的存在性、不变量支集外延子网的可覆盖性;给出了一个工作流网模型保持可靠性(soundness)的充要条件;提出了 P -不变量的多项式分解算法;基于广义工作流网的概念,利用 P -不变量分解算法,结合矩姆函数,建立了工作流系统的性能分析方法,该方法克服了以往分析方法可能带来的状态爆炸和时间复杂性较高的不足,分析复杂度是多项式的,具有良好的应用价值,同时还具有简单、易理解、操作性强的优点,对于分析工作流系统处理业务实例的能力,提高业务处理效率有重要意义;给出的实例验证了算法的有效性.

本文第 2 节介绍一些基本的定义和引理;第 3 节证明工作流网的 T -不变量和 P -不变量的存在性、不变量支集外延子网的可覆盖性,给出一个工作流网模型保持可靠性(soundness)的充要条件,并提出 P -不变量的多项式分解算法;第 4 节建立工作流的广义 Petri 网模型和基于 P -不变量分解的工作流性能分析方法;第 5 节给出分解及性能分析的实验结果;第 6 节介绍相关工作;第 7 节总结本文的工作.

2 基本概念及引理

有关工作流网和 Petri 网的基本概念,请读者参阅文献[3, 12-14],仅就本文中用到的主要概念介

绍如下.

定义 1. 三元组 $N=(P, T; F)$ 是一个网, 当且仅当 P, T 分别是库所和变迁的有限集, $P \cap T = \emptyset$; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是流关系. $PN=(N, M)$ 是 Petri 网, 当且仅当 $N=(P, T; F)$ 是一个网, 且 $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ 是 PN 的标识函数.

(1) $t \in T$ 在 M 下是使能的, 当且仅当 $\forall p \in \cdot t, M(p) > 0$, 记 $M[t]$;

(2) 对 $\forall M_1$ 和 $M_2, M_1 \leq M_2$, 当且仅当对所有的 $p \in P: M_1(p) \leq M_2(p)$;

(3) (PN, M_0) 是活的, 当且仅当 $\forall t \in T, \forall M \in R(M_0), \exists M' \in R(M), M'[t]$;

(4) (PN, M_0) 是有界的, 当且仅当对 $\forall p \in P, \forall M \in R(M_0), \exists k \in N^+, M(p) \leq k$;

(5) PN 是结构有界的, 当且仅当对 $\forall M_0, (PN, M_0)$ 是有界的;

(6) 若对 $\forall p \in P: |\cdot p| = |p \cdot| \leq 1$, 则称 PN 为一个 T -组件网 (T -Component), 若对 $\forall t \in T: |t| = |\cdot t| \leq 1$, 则称 PN 为一个 P -组件网 (P -Component);

(7) Petri 网 $PN'=(P', T', F')$ 是 PN 的子网, 当且仅当 $P' \subseteq P, T' \subseteq T, F' = F \cap ((P' \times T') \cup (T' \times P'))$; Petri 网 $PN'=(P', T', F')$ 是 PN 库所子集 P' 的外延子网, 当且仅当 $P' \subseteq P, T' = \cdot P' \cup P' \cdot; F' = F \cap ((P' \times T') \cup (T' \times P'))$;

(8) $|P| = m, |T| = n, \mathbf{A}$ 是 PN 的关联矩阵. $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times m}$, 其中 $a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^-, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$,

$$a_{ij}^+ = \begin{cases} 1, & (t_i, s_j) \in F \\ 0, & \text{否则} \end{cases}, a_{ij}^- = \begin{cases} 1, & (s_j, t_i) \in F \\ 0, & \text{否则} \end{cases}.$$

如果非平凡的 m 维非负整数向量 \mathbf{Y} 满足 $\mathbf{A}\mathbf{Y} = 0$, 则称 \mathbf{Y} 为 PN 的一个 P -不变量; 如果非平凡的 n 维非负整数向量 \mathbf{X} 满足 $\mathbf{A}^T\mathbf{X} = 0$, 则称 \mathbf{X} 为 PN 的一个 T -不变量; $\|\mathbf{Y}\| = \{p_i \in P | \mathbf{Y}(i) > 0\}, \|\mathbf{X}\| = \{t_j \in T | \mathbf{X}(j) > 0\}$ 分别称为 P -不变量 \mathbf{Y} 和 T -不变量 \mathbf{X} 的支集; 对任意的 $P_2 \subset P_1 = \|\mathbf{Y}\| (T_2 \subset T_1 = \|\mathbf{X}\|)$ 都不是 PN 的 P -不变量支集 (T -不变量支集), 则称 $P_1(T_1)$ 为 PN 的 P -不变量 (T -不变量) 的极小支集;

(9) 一个标志 M_h 称为家态, 当且仅当对 $\forall M \in R(M_0), M_h \in R(M); (PN, M_0)$ 是可逆的, 当且仅当 M_0 是家态.

定义 2. Petri 网模型 $PN=(P, T, F, i)$ 称为工作流网 (Workflow net, 简称 WF-net) 当且仅当:

(1) PN 中存在两个特殊的库所 i 和 o , 库所 i

是一个起始库所, 即 $\cdot i = \emptyset$; 库所 o 是一个终止库所, 即 $o \cdot = \emptyset$;

(2) 如果在 PN 中加入一个新的变迁 t , 使 t 连接库所 o 和 i , 即 $\cdot t = \{o\}, t \cdot = \{i\}$, 这时所得到的扩展网 \overline{PN} 是强连通的.

定义 3. 一个 WF-net PN 是可靠的 (Soundness), 当且仅当:

(1) 对每一个由状态 i 可达的状态 M , 存在一个从状态 M 到状态 o 发生序列, 即 $\forall M: i[\sigma]M \Rightarrow M[\tau]o$, 其中 σ, τ 为变迁序列;

(2) 在任何情况下, 终止状态最终可以到达, 当状态由 M 变化到状态 o 时, 只有 o 中含有一个 Token, 其它位置均为空, 即 $\exists M: i[\sigma]M \wedge M(o) = 1 \wedge (\forall p \neq o, M(p) = 0)$;

(3) 在 WF-net 中不存在死的变迁, 即 $\forall t \in T, \exists M, M': i[\sigma]M, M[t]M'$.

van der Aalst 给出的工作流的可靠性 (Soundness) 的概念主要描述了工作流的功能可靠性, 从过程集成角度看, 工作流是由若干个相互联系协调完成同一目标的任务组成的业务过程. 过程执行也必需保证应用的语义原子性. 具有不同属性的活动的组合失配可能会破坏执行的语义原子性, 存在组合失配问题的工作流过程定义是非良构的, 本文假设工作流过程定义都是良构的.

定义 4. 设 PN 是一个 Petri 网, 一个从节点 n_1 到 n_k 的路径 C 是一个节点的序列 $\langle n_1, n_2, \dots, n_k \rangle$, 其中 $\langle n_i, n_{i+1} \rangle \in F, 1 \leq i \leq k-1, \alpha(C) = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ 是路径 C 的字母表. 路径 C 是基本的, 当且仅当对路径 C 上的任意两个节点 n_i, n_j , 若 $i \neq j \Rightarrow n_i \neq n_j$.

定义 5. 一个 Petri 网是强连通的, 当且仅当对于每一对节点 $x, y \in P \cup T$, 都存在一个从 x 到 y 的路径.

定义 6. 一个 Petri 网在结构上是良构的, 当且仅当对任意一对不同类型的节点 x, y (一个为变迁, 一个为库所), 若 C_1, C_2 是从 x 到 y 的任意两条基本路径, 且 $\alpha(C_1) \cap \alpha(C_2) = \{x, y\} \Rightarrow C_1 = C_2$. 一个工作流网结构上是良构的当且仅当扩展网结构上是良构的.

引理 1^[3]. 一个 WF-net PN 具有可靠性当且仅当 PN 的扩展网 \overline{PN} 具有活性和有界性.

引理 2^[13]. 一个 Petri 网 PN 是守恒网当且仅当 P 是一个 P -不变量支集.

引理 3^[13]. 一个 Petri 网 PN 是守恒网, 则 PN 是结构有界网.

引理 4^[15]. 一个可逆 Petri 网 PN 是活的当且仅当它的每个变迁都是一次活的。

3 工作流网性质分析及分解算法

3.1 工作流网性质及可靠性分析

性质 1. 一个可靠 WF-net PN 的扩展网 \overline{PN} 至少存在一个 T -不变量。

证明. 由定义 3(1)、(2) 及扩展网的定义可知, \overline{PN} 存在一个变迁序列 $\sigma = t_1 t_2 \cdots t^*$, 使得 $i[\sigma]i$, 这表明变迁序列 σ 在形式上没有改变 \overline{PN} 的状态, 因此构造一个非平凡的 $n+1$ 维非负整数向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1})$, 其中 $x_i = |t_i|$, $x_{n+1} = |t^*|$, $i=1, \dots, n$, $|t_i|$ 表示变迁 t_i 在 σ 中出现的次数, 则向量 \mathbf{X} 满足 $A^T \mathbf{X} = 0$, 即 \mathbf{X} 为 \overline{PN} 的一个 T -不变量, 变迁序列 σ 是 \overline{PN} 的一个 T -不变量支集, 性质 1 得证。

证毕。

推论 1. \overline{PN} 中一个 T -不变量的支集若含有变迁 t^* , 则支集对应着 PN 中所反应一个业务实例的执行序列。

由模型影射结果, 该结论是显然的。

性质 2. 一个可靠 WF-net PN 的变迁集合 T 被其扩展网 \overline{PN} 的 T -不变量的支集 $R = \{T_1, T_2, \dots, T_k\}$ 所覆盖。

证明. 假设变迁集合 T 不被其扩展网 \overline{PN} 的 T -不变量的支集所覆盖, 则至少存在一个变迁 $t \in T$, 对 $\forall T_i \in R, t \notin T_i$. 由 PN 的可靠性可知, 对 $\forall M \in R(i), \exists M' \in R(M); M'[\tau\sigma]o[t^*]i$ 成立, 即 t 存在 \overline{PN} 的一个循环结构上, 这个循环结构上的所有变迁便构成了 \overline{PN} 的一个 T -不变量的支集. 这与 $\forall T_i \in R, t \notin T_i$ 相矛盾, 故性质 2 得证。

证毕。

推论 2. 一个可靠 WF-net PN 的扩展网 \overline{PN} 存在一个正整数的 T -不变量。

性质 3. 一个 WF-net PN 是可靠的, 则扩展网 \overline{PN} 的 T -不变量的极小支集的外延子网是一个 T -组件网, 且 \overline{PN} 被其所覆盖。

证明. 假设存在一个 T -不变量的极小支集的外延子网 $PN' = (P', T', F')$ 不是一个 T -组件网, 则存在一个库所 $p \in P'$ 使得 $|p'| \geq 2$ 或 $|\cdot p| \geq 2$, 不妨设 $|p'| = 2$, 分别记作 $t_1, t_2 \in T'$, 因为 \overline{PN} 在结构上是良构的, 则在 \overline{PN} 上一定存在一个 p' 与 p 相对应, 且 $|\cdot p'| \geq 2$, 否则, 因为 PN 只有 1 个终止库所 o , 所以在 \overline{PN} 上一定存在一个 p' 与 p 相对应, 且

$|p'| = 1$, 定义 p 经 t_1 到 $\cdot p'$ 的路径为 C_1 , p 经 t_2 到 $\cdot p'$ 的路径为 C_2 , 由 Petri 网的良构定义, 则 $\alpha(C_1) \cap \alpha(C_2) = \{p, \cdot p'\} \Rightarrow C_1 = C_2$, 即 $t_1 = t_2$, 与 $|p'| = 2$ 相矛盾, 即在 \overline{PN} 上一定存在一个 p' 与 p 相对应, 且 $|\cdot p'| \geq 2$ 结论得证。

证毕。

令 t_3, t_4 是 p' 前集的两个变迁, 分别在路径 C_1, C_2 上, 由于 PN 是可靠的, 则下列两式成立:

$$\forall M \in R(i), \exists M' \in R(M); M'[\tau_1 \sigma_1 t_3 \sigma'] o[t^*] i,$$

$$\forall M \in R(i), \exists M' \in R(M); M'[\tau_2 \sigma_2 t_4 \sigma'] o[t^*] i.$$

因此将 t_2 到 t_4 的路径从 PN' 中删掉, 则子网 PN' 上的变迁仍然是一个 T -不变量支集, 这与极小 T -不变量支集的定义相矛盾, 所以 \overline{PN} 的 T -不变量的极小支集的外延子网是一个 T -组件网; 由性质 2 容易证得 \overline{PN} 被其所覆盖。

性质 4. 一个可靠 WF-net PN 至少存在一个 P -不变量。

证明. 假设 PN 不存在 P -不变量, 因为 PN 的扩展网 \overline{PN} 是强连通的, 所以存在一条从初始库所 i 到终止库所 o 的一条路径 C , 不妨记作 $C = \langle i, p_1, \dots, p_k, o \rangle$ (将中间的变迁去掉后得到), 现在遍历路径 C 上库所, 对 $\forall p_i \in C$, 若 $|p_i| (p_i \text{ 在 } PN \text{ 中}) \geq 2$, 由于 PN 在结构是良构的, 由性质 3 的证明方法, 可以证得在路径 C 上存在一个 $p_j: |\cdot p_j| (p_j \text{ 在 } PN \text{ 中}) \geq 2$, 与 p_i 成对出现, 分两种情况讨论:

(1) 若 p_j 存在 C 中从 p_i 到终止库所 o 的路径上, 则 p_i (or-split) 与 p_j (or-join) 组成一个选择路由, 此时将 p_i 到 p_j 的另一条路径 C_1 上的所有库所并入到 C 中, 得到新的 $C = C \cup C_1 \setminus \{t | t \in C_1\}$;

(2) 若 p_j 存在 C 中从初始库所 i 到 p_i 的路径上, 则从 p_i 到 p_j 组成一个循环路由, 同样将 p_i 到 p_j 的另一条路径 C_2 上的所有库所并入到 C 中, 得到新的 $C = C \cup C_2 \setminus \{t | t \in C_2\}$;

重复以上步骤, 直到 C 中所有 $|p_i| (p_i \text{ 在 } PN \text{ 中}) \geq 2$ 库所遍历完毕。

现在来讨论新得到的 C 中的所有库所组成 PN 的一个 P -不变量支集:

假设 Token 从初始库所 i 出发到 p_i 时遇到第一个选择路由或循环路由, 则从 i 到 p_i 之间存在两种路由结构, 若从 i 到 p_i 是顺序路由, 则 i 到 p_i 之间的库所只进行了 Token 的传递, 该过程中, Token 的数量保持库所 i 的数量不变; 若从 i 到 p_i 之间有并发路由, 由 C 的构造可知, 在构造 C 时, 只选取了并发路由中的一个顺序路由作为其一部分, 因此 Token 在经过该并发路由中顺序路由部分时, Token

数量保持库所 i 的数量不变,无论在遇到循环结构或选择结构 p_i 时, p_i 中的 Token 只能流向其中的一个后继库所(用 $success(p_i)$ 表示),所以 C 中增加的 C_1, C_2 中的库所与 $\{success(p_i), \dots, pref(p_j)\} \subseteq C(pref(p_j))$ 表示 p_j 的前置库所中的库所的 Token 之和等于 p_i 中的 Token,即经过选取的这种选择或循环路由到达 p_j 过程中,Token 的数量保持不变,所以最终得到的 C 中所有库所中的 Token 数的总和是一个只与库所 i 中 Token 数有关的一个。

通过上述构造过程,可以得到一个非平凡的 m 维非负整数向量 \mathbf{Y} 满足 $\mathbf{A}\mathbf{Y} = \mathbf{0}$, 其中 y_i 为上述构造过程库所中 Token 增减的数量, $i = 1, 2, \dots, m$. 由 P -不变量支集的定义可得: C 中的所有库所组成 \overline{PN} 的一个 P -不变量支集,这与假设相矛盾,故 \overline{PN} 至少存在一个 P -不变量。

性质 5. 一个可靠 WF-net \overline{PN} 的库所集合 P 被其 P -不变量的支集集合 $R = \{P_1, P_2, \dots, P_k\}$ 所覆盖。

证明. 由性质 4 的构造过程,便可得证。

推论 3. 一个可靠 WF-net \overline{PN} 存在一个正整数的 P -不变量。

性质 6. 一个可靠 WF-net \overline{PN} 的 P -不变量的极小支集的外延子网是一个 P -组件网,且 \overline{PN} 被其所覆盖。

证明. 由性质 4 的构造过程,容易证得 P -不变量的支集的外延子网是一个 P -组件网;由性质 5 容易证得 \overline{PN} 被其 P -不变量的支集的外延子网所覆盖。

定理 1. 一个 WF-net \overline{PN} 是可靠的,当且仅当扩展网 \overline{PN} 的 T -不变量的极小支集的外延子网是一个 T -组件网,且 \overline{PN} 被其所覆盖, P -不变量的极小支集的外延子网是一个 P -组件网,且 \overline{PN} 被其所覆盖, i 为家态。

证明. 只要证明 WF-net \overline{PN} 的可靠性等价即可。

(\Rightarrow) 由性质 3 和性质 6 直接得证,由定义 1(9) 容易证明 i 为家态。

(\Leftarrow) 先证 \overline{PN} 是有界的, P -不变量的极小支集的外延子网是一个 P -组件网,且 \overline{PN} 被其所覆盖,可以得到 P 是 \overline{PN} 的一个 P -不变量支集,由引理 2 和引理 3 得 \overline{PN} 是结构有界的,即 \overline{PN} 有界得证。

再证 \overline{PN} 是活的,因为 \overline{PN} 的 T -不变量的极小支集的外延子网是一个 T -组件网,且 \overline{PN} 被其所覆盖,则 $\|\mathbf{X}\| = T$ 是 \overline{PN} 一个 T -不变量支集,即 \overline{PN} 是一个

可重复网系统, i 为家态,又因为 \overline{PN} 是良构的,下面证明 \overline{PN} 是活的。

假设 \overline{PN} 不是活的,则 $\exists t \in T$ 是死变迁,即 $\exists p \in \cdot t, M \in R(i), M(p) = 0$, 即 $\cdot p$ 也不能发生,重复上述步骤,最终可以找到一个 p' , $\cdot p'$ 能够发生,且 $|\cdot p'| \geq 2$, 此时存在两种情况,第 1 种情况是至少存在两条从 p' 到 t 的路径,这与 \overline{PN} 是良构的定义矛盾;第 2 种情况是 t 在 p' 选择结构其中的一条路径上,因此 p' 中的 Token 流向 t 所在的路径时, t 可以发生,这与假设相矛盾,因此对 $\forall t \in T, t$ 至少可以发生一次,由引理 4 可知, \overline{PN} 是活的。

定理 1 不仅证明了一个可靠的工作流网模型可以分解成一组 T -组件网和 P -组件网,还得到了模型可靠性的验证方法,这些性质和定理为工作流的性能分析提供了理论依据。

3.2 基于 P -不变量的分解算法

一个工作流模型是用来描述一类业务实例的处理过程,因此通过某种分解算法,将一个复杂的、完整的工作流网分解成一组简单的能够描述单个业务实例处理过程的子网类,对于分析工作流的性质、业务处理的能力,将带来极大的方便,通过分解,可以降低分析的复杂性,提高分析效率,还可以进一步判断工作流网完成其功能的有效性,有利于分析模型的结构与真实系统的一致性以及模型的结构和行为等性质。

本文的 3.1 节的性质说明了工作流网是可以分解并且能分解得到具有良好结构的子网,下面给出一种基于 P -不变量的分解算法,该算法是一个多项式算法,为分析工作流系统的性能提供帮助。

算法思想:

在本文的第 3.1 节中,得到了可靠工作流网可以分解成一组 P -组件网的性质,利用其证明的过程,首先构建工作流网的扩展网,通过代数方法求得工作流网扩展网的 P -不变量,再影射成 P -不变量支集,在所有包含扩展网变迁的支集的基础上,构建外延子网,最终得到所有的分解子网。

算法步骤:

输入: 一个可靠的工作流网;

输出: 工作流网的分解子网;

1. 通过在起始库所 i 和终止库所 o 增加新的变迁 t^* , 即 $\cdot t^* = \{o\}, t^{*\cdot} = \{i\}$, 以构建扩展工作流网 \overline{PN} 。

2. 通过求解方程组 $\mathbf{A}\mathbf{Y} = \mathbf{0}$, 得到所有非平凡的 m 维非负整数向量 \mathbf{Y} , 向量 \mathbf{Y} 对应的支集集合为 $R = \{P_1, P_2, \dots, P_k\}$ 。

3. 对 $\forall P_j \in R$, 构建 \overline{PN} 的一个外延连通子网, 记为

$PN_j = (P_j, T_j, F_j)$, 令 $R = R \setminus \{P_j\}$, 重复执行步 3, 直到 $R = \emptyset$, 得到集合 $R_{PN} = \{PN_1, PN_2, \dots, PN_k\}$.

4. 将 R_{PN} 中所有的 PN_j 中变迁 t^* 删除, 并删除其连接弧 (o, t^*) 和 (t^*, i) .

算法复杂性分析.

该算法主要为用来研究和分析资源约束的工作流系统性能而建立的, 这是该算法的一个主要目的, 该算法具有典型的结构分解特性, 不用考虑系统的状态变化, 能有效避免状态爆炸问题, 且不用专门处理系统的循环结构, 因为循环结构内部的库所是扩展网 \overline{PN} 的 P -不变量的一部分, 这一点可由 3.1 节中的证明得到. 这使得分解算法具有简单、易理解、操作性强的优点, 复杂性也大为降低.

算法步 1 和步 4 分别用来构建和消除扩展工作流网(分别通过增加和删除附加变迁 t^*), 步 2 和步 3 用来求解扩展网 P -不变量支集和支集的外延子网, 便得到所有要分解的子网.

算法中求解 P -不变量的分解算法是一个多项式算法, 这是因为求解线性方程组 $AY=0$ 是一个多项式算法^[16], 求扩展网的 P -不变量支集的外延子网, 是一个线性查询的过程, 因此也可以在多项式时间内完成, 综合上述分析, 这个算法是一个多项式算法, 其复杂性可由库所的多项式表示. 同样, 基于 P -不变量的分解算法, 不仅是多项式算法, 同时此算法还有很好的并行性, 在多处理器环境下, 可以进一步提高分解的计算速度.

4 基于 P -不变量分解的工作流性能分析

本节的思想是, 利用 P -不变量分解算法, 将广义工作流网分解, 得到的所有的子网都是状态图, 再对每个分解子网求解它们的传递函数, 最后利用分解的逆方法对子网的传递函数进行运算得到广义工作流网的传递函数. 有关的几个概念和定理如下.

4.1 广义工作流网 (Generalized WF-net, 简称 GWF-net)

定义 7. 广义工作流网为二元组 $GWF-net = (WF-net, \mu)$, 其中

(1) $WF-net = (P, T, F, i)$ 为工作流网;

(2) μ 为变迁的引发速率的集合, $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k\}$ (k 为变迁总数);

基于广义工作流网的定义, 可以比较容易得到其扩展网的定义.

根据工程实际, 假设广义工作流网所描述的工作流模型的变迁引发速率服从负指数分布.

4.2 性能分析方法

定义 8. 设 x 是一个随机变量, 则 e^{sx} 的期望值称为 x 的矩姆函数 (Moment Generation Function), 记为 $MGF(s) = E(e^{sx})$ (s 为实变数).

定义 9. 按照 Petri 网变迁使能规则, 当变迁 t 只有一个输入库所 p , 且 p 中至少有一个 Token, 则变迁 t 使能, t 使能后, 将其前置库所中的一个 Token 转移到其后置库所, 令 $\rho(p, t)$ 表示变迁 t 的引发概率, 变迁 t 的延迟是一个常数或者是一个随机变量 $\rho(p, t)$ 、变迁 t 的矩姆函数 $MGF(s)$ 依赖于变迁 t 的时间延迟、库所 p 当前 Token 数量以及其它相关的可使能的变迁, 因此定义转移函数为 $W_t(s) = \rho(p, t)MGF(s)$.

设 t_1 和 t_2 是两个时延分别为 X_1 和 X_2 的发射变迁, X_1 和 X_2 是独立的. X_i 对应的矩姆函数是 $MGF_i(s)$, t_i 对应发射概率和传递函数分别是 ρ_i 和 $W_i(s)$, 文献[13]分别给出了顺序结构、选择结构和循环结构的矩姆函数和传递函数的表达式, 为了证明定理 3, 在此仅给出定理 2 来说明循环结构的表达式.

定理 2^[13]. 对于循环结构 t_1 和 t_2 (其中只有 t_1 循环, t_2 是循环的后继变迁), 则该结构的矩姆函数和传递函数可表示为

$$(1) MGF(s) = \frac{\rho_1 MGF_1(s)}{1 - \rho_2 MGF_2(s)};$$

$$(2) W(s) = \frac{W_1(s)}{1 - W_2(s)}.$$

这里的概率与每次循环执行的具体次数有关, 可理解为 t_1 和 t_2 执行次数与它们执行总次数的比值 (此时的概率是一个变频的参数).

定理 2 实际上只给出了 While 循环结构的转移函数表达式 (如图 1), 对于 Until 循环结构, 利用文献[17]的证明方法给出下面的定理

图 2 给出了 Until 循环结构及其等价变换结构 (t'_1 是 t_1 的等价变迁), 下面分析相关速率的关系.

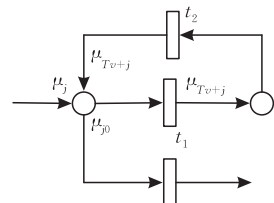


图 1 While 循环结构

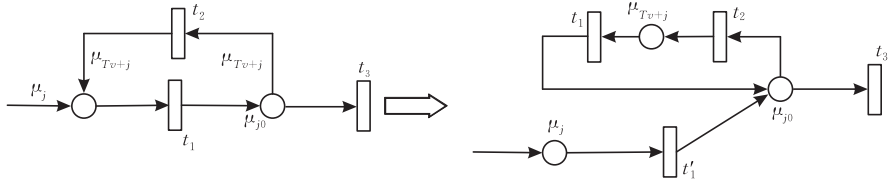


图 2 Until 循环结构及其等价变换结构

定理 3. 如图 2 的 Until 循环结构,在条件下,该结构的矩姆函数和传递函数可以表示为

$$(1) MGF(s) = \frac{\rho'_1 MGF'_1(s) \rho_1 MGF_1(s)}{1 - \rho_2 MGF_2(s)};$$

$$(2) W(s) = \frac{W'_1(s)W_1(s)}{1 - W_2(s)}$$

证明. 由图 2 可知,Until 循环结构是由一个变迁和一个 While 循环结构组成的顺序结构,由定理 2 和顺序结构表达式联合,可以得到

$$MGF(s) = \frac{\rho'_1 MGF'_1(s) \rho_1 MGF_1(s)}{1 - \rho_2 MGF_2(s)}$$

和

$$W(s) = \frac{W'_1(s)W_1(s)}{1 - W_2(s)}$$

成立,定理得证.

证毕.

由上面的定理可以得到任意状态图的传递函数.

下面讨论基于 P -不变量分解算法的工作流系统的性能分析方法.

其分析方法的具体步骤:

(1) 根据 P -不变量的分解算法构建 P -不变量支集外延子网(每个子网为一个状态图);

(2) 利用已知的变迁平均执行时间求得各变迁的发射速率 $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k\}$;

(3) 根据定义 8 和定义 9,在每一个 P -不变量支集外延子网上求得变迁的传递函数.

(4) 根据上述定理计算出每个 P -不变量支集的传递函数.

(5) 对(4)中得到的所有传递函数求和即为整个工作流网的传递函数.

(6) 基于(5)和矩姆函数的有关分析方法得到工作流网相应的分析结果.

文章将在下面的分析示例中说明其有效性.

5 基于 P -不变量分解的工作流性能分析示例

5.1 基于 P -不变量分解算法示例

图 3 给出了一个典型工作流的广义工作流网模型,不难证明该工作流网是可靠的,图 4 给出了它的扩展网,其中变迁上的数字标签表示变迁的平均延迟时间.

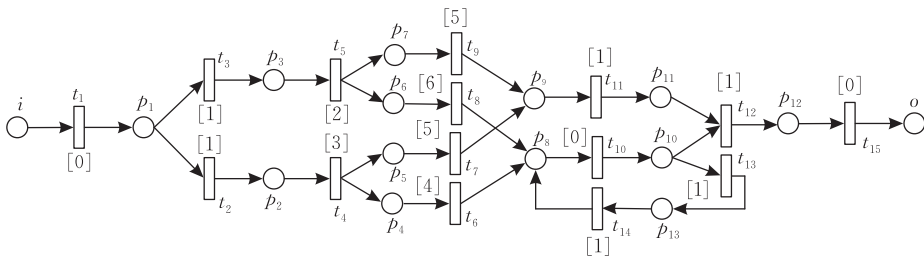


图 3 工作流系统的 GWF-net 模型

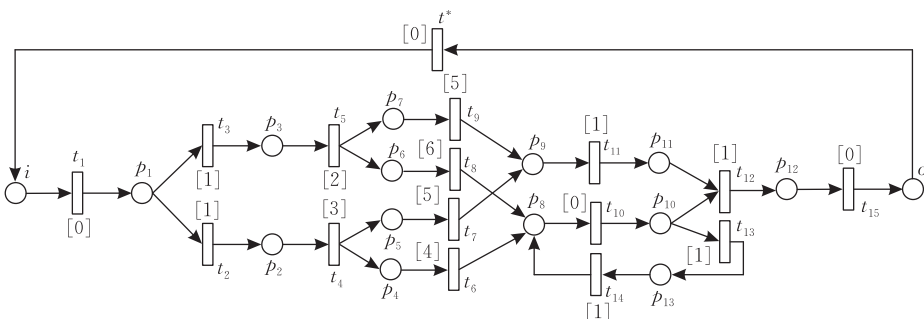


图 4 GWF-net 模型的扩展网

根据分解算法,由图 4 可以得到扩展工作流网 \overline{PN} 的关联矩阵 A .

由步骤 2,通过求解方程组 $AY=0$ 得到 \overline{PN} 的所有极小 P -不变量为 $y_1=(1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0,1,1,0,1), y_2=(1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1)$,它们同样也是 WF-net PN 的极小 P -不变量;不变量对应的支集分别为 $P_1=(i, p_1, p_2, p_3, p_5, p_7,$

$p_9, p_{11}, p_{12}, o), P_2=(i, p_1, p_2, p_3, p_4, p_6, p_8, p_{10}, p_{12}, p_{13}, o)$.

由步 3,得到 \overline{PN} 的两个 P -不变量支集的外延连通子网 $PN_1、PN_2$,如图 5、图 6,由步 4,将所有的 PN_j 中变迁 t^* 删除,并删除其连接弧 (o, t^*) 和 (t^*, i) ,便得到由 P -不变量分解而来的子网 $PN_1、PN_2$,如图 7、图 8.

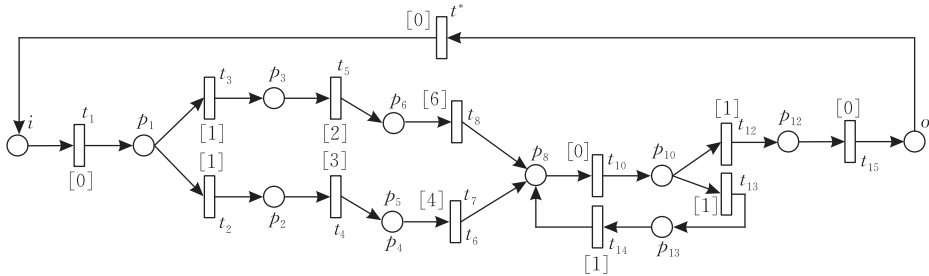


图 5 P -不变量支集 P_1 的外延连通子网 PN_1

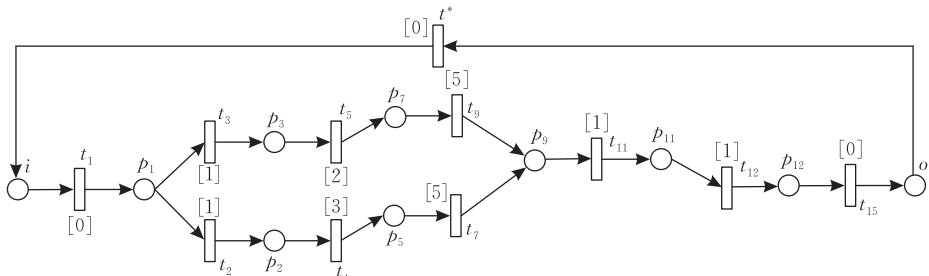


图 6 P -不变量支集 P_2 的外延连通子网 PN_2

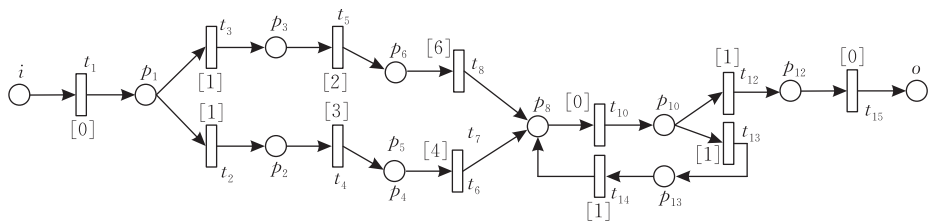


图 7 P -不变量支集 P_1 的分解子网 PN_1

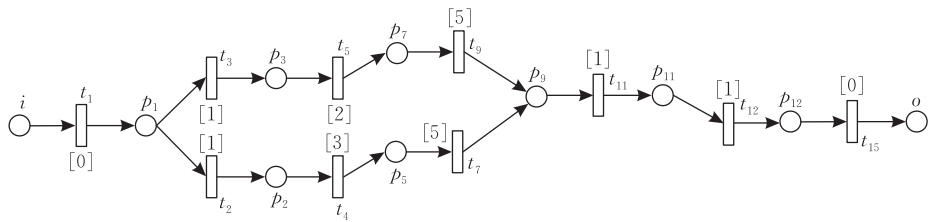


图 8 P -不变量支集 P_2 的分解子网 PN_2

通过上述分解示例,能够看出扩展网 \overline{PN} (图 4) 含有 2 个有极小 P -不变量,并且被它们的外延子网覆盖,这一点由上面的分解算法进一步得到证实.当我们研究业务过程的资源处理问题时,该分解为分析带来较大帮助,因为 P -不变量反映了系统资源的分布和流动情况,从分解得到的子网中可以清晰地

分析资源(如文件信息等)在工作流系统中的加工和传递过程,从资源建模的角度分析,理论上该工作流在同时确保 2 种不同的信息数据等资源进行传递或加工,而互不影响,其性能将全部得到发挥,当同时需要处理的业务处理种类大于等于 3 个时,系统因资源占用,会出现等待状态,即系统性能将有所下

降,所以通过 P -不变量分解来分析研究工作流系统的资源情况,来保证 workflow 系统正常运行的重要手段,也是十分重要的。

5.2 工作流性能分析示例

由广义 workflow 网模型(图 3),可求解得到变迁平均发射速率向量为 $\mu = (\infty, 1, 1, 1, 1/3, 1/2, 1/4, 1/5, 1/6, 1/5, \infty, 1, 1, 1, 1, \infty)$,有些变迁的平均执行时间为 0,求得其引发速率为无穷大,根据定义 8,可得到该变迁的矩姆函数 $MGF(s) = 1$ 。

根据矩姆函数和传递函数的定义及定理,分别求解得到子网 PN_1 (图 7)和子网 PN_2 (图 8)的传递函数,最后求得整个广义 workflow 网的传递函数。

在图 7 中,子网 PN_1 每个变迁的传递函数分别为

$$W_{t_1}(s) = 1; \quad W_{t_2}(s) = \frac{\mu_2}{\mu_2 + \mu_3 - s};$$

$$W_{t_3}(s) = \frac{\mu_3}{\mu_2 + \mu_3 - s}; \quad W_{t_4}(s) = \frac{\mu_4}{\mu_4 - s};$$

$$W_{t_5}(s) = \frac{\mu_5}{\mu_5 - s}; \quad W_{t_6}(s) = \frac{\mu_6}{\mu_6 - s};$$

$$W_{t_8}(s) = \frac{\mu_8}{\mu_8 - s}; \quad W_{t_{10}}(s) = 1;$$

$$W_{t_{12}}(s) = (1 - \rho_{13}) \frac{\mu_{12}}{\mu_{12} + \mu_{13} - s};$$

$$W_{t_{13}}(s) = \rho_{13} \frac{\mu_{13}}{\mu_{12} + \mu_{13} - s};$$

$$W_{t_{14}}(s) = \frac{\mu_{14}}{\mu_{14} - s}; \quad W_{t_{15}}(s) = 1.$$

由定理,可以计算图 7 子网 PN_1 的传递函数为

$$W_{T_1}(s) = W_{t_1}(s)(W_{t_2}(s)W_{t_4}(s)W_{t_6}(s) + W_{t_3}(s)W_{t_5}(s)W_{t_8}(s))W_{t_7}(s)W_{t_{15}}(s) \quad (1)$$

其中, $W_{t_i}(s) = \frac{W_{t_{10}} W_{t_{13}} W_{t_{14}} W_{t_{10}}}{1 - W_{t_{12}}}$ 表示了循环结构的传递函数。

在图 8 中,子网 PN_2 每个变迁的传递函数分别为

$$W_{t_1}(s) = 1; \quad W_{t_2}(s) = \frac{\mu_2}{\mu_2 + \mu_3 - s};$$

$$W_{t_3}(s) = \frac{\mu_3}{\mu_2 + \mu_3 - s}; \quad W_{t_4}(s) = \frac{\mu_4}{\mu_4 - s};$$

$$W_{t_5}(s) = \frac{\mu_5}{\mu_5 - s}; \quad W_{t_7}(s) = \frac{\mu_7}{\mu_7 - s};$$

$$W_{t_9}(s) = \frac{\mu_9}{\mu_9 - s}; \quad W_{t_{10}}(s) = 1;$$

$$W_{t_{11}}(s) = \frac{\mu_{11}}{\mu_{11} - s}; \quad W_{t_{12}}(s) = \frac{\mu_{12}}{\mu_{12} - s};$$

$$W_{t_{13}}(s) = 1;$$

由定理,可以计算图 8 子网 PN_2 的传递函数为

$$W_{T_2}(s) = W_{t_1}(s)(W_{t_2}(s)W_{t_4}(s)W_{t_7}(s) + W_{t_3}(s)W_{t_5}(s)W_{t_9}(s))W_{t_{11}}(s)W_{t_{12}}(s)W_{t_{15}}(s) \quad (2)$$

此时,可以得到整个 workflow 模型的传递函数为

$$W_T(s) = W_{T_1}(s) + W_{T_2}(s) \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3),可进一步得到

$$W_T(s) = W_{t_1}(s)((W_{t_2}(s)W_{t_4}(s)W_{t_6}(s) + W_{t_3}(s)W_{t_5}(s)W_{t_8}(s))W_{t_7}(s) + (W_{t_2}(s)W_{t_4}(s)W_{t_7}(s) + W_{t_3}(s)W_{t_5}(s)W_{t_9}(s))W_{t_{11}}(s)W_{t_{12}}(s))W_{t_{15}}(s), \\ W_{T_1}(s) = W_{t_1}(s)((W_{t_2}(s)W_{t_4}(s)(W_{t_6}(s)W_{t_7}(s) + W_{t_7}(s)W_{t_{11}}(s)W_{t_{12}}(s)) + W_{t_3}(s)W_{t_5}(s)(W_{t_8}(s)W_{t_7}(s) + W_{t_9}(s)W_{t_{11}}(s)W_{t_{12}}(s))W_{t_{15}}(s) \quad (4)$$

不难发现,求解传递函数的复杂度不是传递函数的计算,而是准备工作,若通过求解可达状态图,其过程没有多项式的算法,并且有状态空间爆炸的可能性,求解行为表达式虽然能够避免状态空间爆炸的可能性,但时间复杂性至少也要随选择结构呈指数增长,基于 P -不变量分解的分析方法是一个多项式的算法,这在前面的分析中得到证明,因此基于 P -不变量分解的分析方法是已知算法中的最优算法。

将前面求得的每个变迁的发射速率代入各自的传递函数,假设循环概率为 0.5,再将求得的传递函数值代入式(1)得

$$W_T(s) = \frac{1}{2-s} \left(\frac{1}{(1-3s)(1-4s)} + \frac{1}{(1-2s)(1-6s)} \right) \frac{1}{(1-s)^2} + \frac{1}{(2-s)(1-5s)} \left(\frac{1}{1-3s} + \frac{1}{1-2s} \right) \frac{1}{(1-s)^2}.$$

由于该 workflow 网具有可靠性,因此扩展网是可逆的,所以 $W_T(s)|_{s=0} = 1$,从而可以得到 workflow 系统平均执行周期和方差为

$$E(t_{\text{GWF-net}}) = \frac{\partial}{\partial s} W_T(s) |_{s=0} = 12.5,$$

$$D(t_{\text{GWF-net}}) = \frac{\partial^2}{\partial s^2} W_T(s) |_{s=0} = 253.25.$$

因此,workflow 系统执行周期的平方差:

$$V(t_{\text{GWF-net}}) = D(t_{\text{GWF-net}}) - E^2(t_{\text{GWF-net}}) = 97.$$

在一个 workflow 执行周期内,考虑循环结构的时延 T' ,令 $W_i(s)$ 中的 $s=0, i = T \setminus \{t_{10}, t_{13}, t_{14}\}$. 此时的传递函数

$$W_T(s) = W_i(s) + W_{i_2}(0) \\ = \frac{\mu_{13}\mu_{14}(\mu_{12} + \mu_{13})}{(\mu_{12} + \mu_{13} - s)(\mu_{14} - s)} + \frac{\mu_{12}}{2(\mu_{12} + \mu_{13})}.$$

将每个变迁的发射速率代入上式得

$$W_T(s) = \frac{2}{(2-s)(1-s)} + \frac{1}{4}.$$

从而可以得到循环结构的平均时延为

$$E(T') = \frac{\partial}{\partial s} W_T(s) \Big|_{s=0} = 1.5.$$

则循环结构的稳态概率为

$$\rho_{T'} = \frac{E(T')}{E(t_{\text{GWF-net}})} = 0.12.$$

若 workflow 网中的某些变迁不服从任何分布,其执行时间为一个规模的函数时,例如一个工程计算过程,可以由式(1)来分析该变迁对工作流执行周期的影响函数。

6 相关工作

在以往的研究中,文献[18]给出了 workflow 网的一个特殊子类——无环自由选择 workflow 网的一个分解算法,文献[2,6]将文献[18]的分解算法推广,进一步给出了含有循环结构的自由选择 workflow 网的分解算法,并在分解的基础上对工作流模型的性能进行了分析,在很大程度上降低了模型性能分析的复杂度,虽然利用上述分解算法对模型分析,其复杂度只随选择库所指数增长,仍然是一个非多项式算法,有一定的局限性。文献[19-20]提出了基于矩姆函数性能分析方法,该方法通过建立 Petri 网的状态图来求解 Petri 网的传递函数,该方法适用于任意分布的随机 Petri 网,并在柔性制造系统分析中得到应用,但求解 Petri 网的状态图还没有多项式算法,还会带来状态爆炸问题;文献[13]在矩姆函数方法的基础上,建立了基于行为表达式的分析方法,通过建立行为表达式求解 Petri 网的传递函数,该方法同样适用于任意分布的随机 Petri 网,该方法虽然能够有效避免状态爆炸问题,其行为表达式求解与状态图的求解具有相同的复杂度。文献[17]将文献[13]的理论成果应用在智能交通模型的分析中,建立了交通系统的分析方法。

7 本文总结

本文提出基于不变量分解的工作流模型性能分析技术,建立了不变量的存在性、workflow 网不变量支

集的可覆盖性等定理,给出了基于 P -不变量和 T -不变量的 workflow 网保持可靠性的一个充要判定定理及证明方法,为 workflow 系统的可靠性验证提供一个简单、有效的验证方法;该分解方法避免了通过建立 Petri 网的状态可达图来分析 workflow 的时间性能,有效解决了空间状态爆炸问题,降低了系统性能分析的时间复杂性,是实现系统性能分析的一个良好途径。

参 考 文 献

- [1] Workflow Management Coalition. The workflow reference model, document number TC00-1003, issue 1.1. <http://www.wfmc.org/standards/docs/tc003v11.pdf>, 19-Jan-1995
- [2] Li Jian-Qiang, Fan Yu-Shun. A method of workflow model performance analysis. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(5): 513-523(in Chinese)
(李建强, 范玉顺. 一种 workflow 模型的性能分析方法. 计算机学报, 2003, 26(5): 513-523)
- [3] van der Aalst W M P. The application of Petri nets to workflow management. The Journal of Circuit, System and Computers, 1998, 8(1): 21-66
- [4] Li Wei, Zeng Guang-Zhou, Wang Xiao-Lin. A workflow model based on timed Petri net. Journal of Software, 2002, 13(8): 1666-1671(in Chinese)
(李炜, 曾广周, 王晓琳. 一种基于时间 Petri 网的工作流模型. 软件学报, 2002, 13(8): 1666-1671)
- [5] Liu Ting, Lin Chuang, Liu Wei-Dong. Linear temporal inference of workflow management system based on timed Petri net models. Acta Electronic Sinica, 2002, 30(2): 245-248(in Chinese)
(刘婷, 林闯, 刘卫东. 基于时间 Petri 网的工作流系统模型的线性推理. 电子学报, 2002, 30(2): 245-248)
- [6] Li Jian-Qiang, Fan Yu-Shun, Zhou Meng-Chu. Timing constrain workflow nets for workflow analysis. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part A: System and Humans, 2003, 33(2): 179-193
- [7] Papazoglou M, Delis A, Bouguettaya A et al. Class library support for workflow environments and application. IEEE Transactions on Computers, 1997, 46(6): 673-686
- [8] Huang Yu, Wang Hanpin, Yu Peng, Xia Yunni. Property-transition-net-based workflow process modeling and verification. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2006, 159: 155-170
- [9] Lin Chuang, Tian Li-Qin, Wei Ya-Ya. Performance equivalent analysis of workflow systems. Journal of Software, 2002, 13(8): 1472-1480(in Chinese)
(林闯, 田立勤, 魏丫丫. 工作流系统模型的性能等价分析. 软件学报, 2002, 13(8): 1472-1480)

- [10] Tang Da, Xu Chao, Yang Xiao-Li. Temporal logic applied in workflow modeling. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2004, 10(4): 388-393(in Chinese)
(唐达, 徐超, 杨晓丽. 工作流建模中时态逻辑的研究与应用. *计算机集成制造技术(CIMS)*, 2004, 10(4): 388-393)
- [11] Du Yu-Yue, Jiang Chang-Jun. Modeling real-time cooperative system with workflow nets. *Chinese Journal of Computers*, 2004, 27(4): 471-481(in Chinese)
(杜玉越, 蒋昌俊. 基于工作流网的实时协同系统模拟技术. *计算机学报*, 2004, 27(4): 471-481)
- [12] Mrata T. Petri nets; Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77(4): 541-580
- [13] Jiang Chang-Jun. *PN Machine Theory of Discrete Dynamic Systems*. Beijing: Science Press, 2000(in Chinese)
(蒋昌俊. 离散事件动态系统的PN机理论. 北京: 科学出版社, 2000)
- [14] Zhou M C, Venkatesh K. *Modeling, Simulation and Control of Flexible Manufacturing Systems; A Petri Net Approach*. Singapore: World Scientific, 1998
- [15] Wu Zhe-Hui. *Introduction to Petri Net*. Beijing: China Machine Press, 2006(in Chinese)
(吴哲辉. Petri网导论. 北京: 机械工业出版社, 2006)
- [16] Tanida T, Watanabe T, Onaga K. A polynomial time algorithm for finding a semi-generator of Petri net invariants// *Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems*. Singapore, 1991: 2838-2841
- [17] Lin Lin, Jiang Chang-Jun. Modeling and analysis of ITS based on GSPN. *Chinese Journal of Computers*, 2005, 28(1): 81-87(in Chinese)
(林琳, 蒋昌俊. 基于广义随机Petri网的交通信息管理系统建模与分析. *计算机学报*, 2005, 28(1): 81-87)
- [18] Li Jian-Qiang, Fan Yu-Shun. Timing boundedness verification and analysis of workflow model. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2002, 8(10): 770-775(in Chinese)
(李建强, 范玉顺. 工作流模型时间有界性验证与分析研究. *计算机集成制造系统*, 2002, 8(10): 770-775)
- [19] Guo Dian-Long, DiCesare Frank, Zhou Meng-Chu. A moment generating function based approach for evaluating extended stochastic Petri nets. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1993, 38(2): 321-327
- [20] Zhou M C et al. Integration of Petri nets and moment generating function approaches for system performance evaluation. *Journal of Systems Integration*, 1993, 3(1): 43-62



PANG Shan-Chen, born in 1974, Ph. D., associate professor. His current main research interests include the Petri net theory and application, formal methods, distributed concurrent system analysis and verification.

JIANG Chang-Jun, born in 1962, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include theory and application of Petri net, formal language and automata theory, concurrency theory and parallel processing, grid technique.

Background

Workflow model is the formal representation of a business process in a form that supports automation fully or in part. As a key for workflow management to achieve high efficiency, the methods of workflow modeling, analysis and optimization have attracted many researchers. Petri nets are well-known formalism for describing concurrent discrete event dynamic systems. Abundance of qualitative and quantitative analysis techniques, formal semantics, and local state-based system description, are three good reasons to use a PN-based workflow management system. Time Petri net (TPN), Colored Petri net (CPN), Stochastic Petri net (SPN), Fuzzy Petri net (FPN), and Hybrid Petri net. Most

of researches focus on the process soundness and workflow performance. This work presents a polynomial decomposition algorithm based on Petri net invariants and aims to overcome the above shortcomings: Loss of resource information, and explosion of a state space. The proposed algorithm is a new simplification strategy that decomposes a complex and sound WF-net to simple subnets that well describe business cases. This work is partly supported by the National Basic Research Program (973 Program) of China under grant No. 2010CB328105 and the National Natural Science Foundation of China under grant Nos. 90718012, and 60970001.